



## Основы наномемbraneной технологии

д.т.н. И.Н.Медведев  
ООО «АКВАМИН®» РФ

Термин – **«наномембранныя технология»** (NM-технология) объединяет понятие электрохимических процессов, протекающих в гетерогенных системах: твёрдое тело + электролит, где на границе раздела фаз самопроизвольно возникает третья нанофаза толщиной **10 – 100 Å**, названная двойным электрическим слоем ( **$\delta$  – DES**).

Идея управляемого  **$\delta$  – DES** созрела из ранее наблюдаемых аномальных автоколебаний электрохимических систем, что вызвало необходимость создания NM-модели  **$\delta$  – DES** типа осциллятора с морфологией **жидкого кристалла (LC)**, где работа LC-осциллятора достигается за счёт энергии **резонатора** электромагнитного поля

Установлена закономерность управления LC, как функция энергии электромагнитного поля. Управление LC энергией электромагнитного поля позволило повысить к.п.д. NM-процессов, в том числе создать резонансный процесс селективного хроматографического разделения полиэлектролита по массе, валентности и знаку заряда.

Применение электромагнитной NM-технологии в инженерной практике позволяет создать энергосберегающие, экологически чистые процессы и аппараты для гидрометаллургии, электрохимии, биологии и других отраслях науки и техники.

## The basics of Nanomembrane Technology

I.N.Medvedev  
Doctor of Scincees (Technology)  
«AQUAMIN®» Co. Ltd. RU

The term nanomembrane technology (NM-technology) implies electrochemical processes taking place in heterogeneous systems: solid body+electrolyte, where at the phase boundary phases, there spontaneously occurs the third nanophase with a thickness of 10-100 Å, named a double electric layer ( **$\delta$  – DES**).

The idea of a controlled  **$\delta$  – DES** has come into being from the earlier observed abnormal self-oscillations of electrochemical systems the generated a need for a NM-model of  **$\delta$  – DES** type for oscillator with the morphology of a liquid crystal (LC), where to control the latter a for an oscillator with the morphology of a liquid cristal (LC), where to control the latter a resonator-electromagnetic field is used.

The regularity of LC control as a function of electromagnetic field energy has been established, which allowed improving the efficiency of NM processes and also creating a resonant process for selective polyelectrolyte chromatograph division by weight, valency and the sign of a charge.

The application of the electromagnetic NM-technology in engineering practice allows creating energy-saving, ecologically benign processes and devices for hydrometallurgy, electrochemistry, biology and other branches of science and engineering.

### 1. Двойной электрический слой ( **$\delta$ – DES**)

Отправным пунктом NM-модели служит представление о наличии трёхфазной гетерогенной системе: лёд + пары воды + вода, которая самопроизвольно образует четвёртую **нанофазу (тройная точка)**, в виде двойного электрического слоя ( **$\delta$  – DES**).

В условиях межфазного равновесия, физические параметры **нанофазы** оцениваются в пределах:

$\delta$  – DES  $\approx$  10 – 100 Å, толщина

E =  $10^6$  –  $10^7$  в/см; напряжённость электрического поля

$\tau = 10^{-3} - 10^{-14}$  сек -время релаксации,  
 $D = 7,0$ - диэлектрическая проницаемость  
 $m$  -масса  $\delta$ -DES (факультатив).

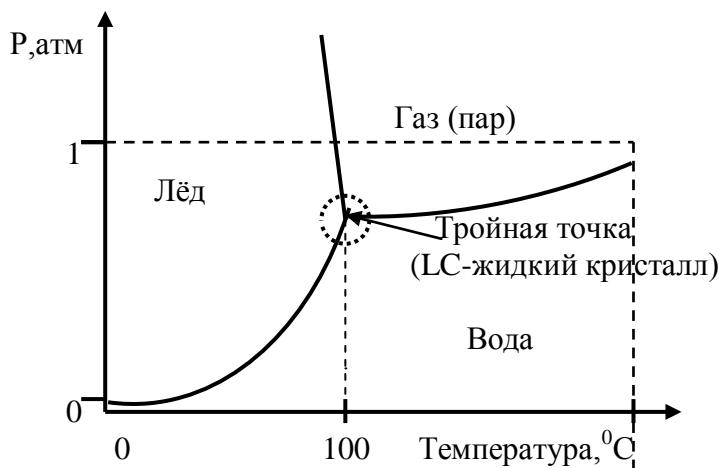


Рис.1.1. Четырёхфазная гетерогенная система: лёд+пар+вода+ LC.

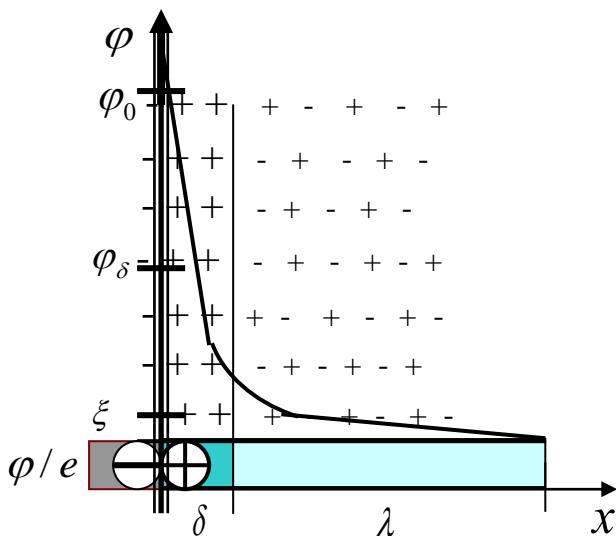
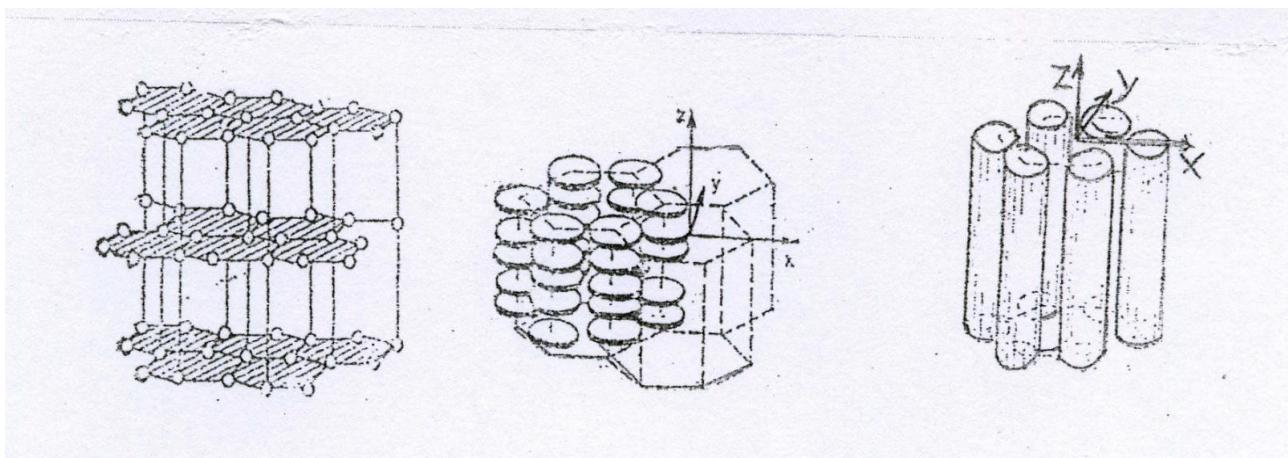


Рис.1.2. Трёхфазная NM-система: твёрдое тело + электролит:  $\lambda$  – диффузный слой,  $\varphi$  – общий потенциал,  $\varphi_0$  - нулевой потенциал,  $\varphi_\delta$  - потенциал плотного слоя,  $\xi$  - электрокинетический потенциал.

## 2. Морфология двойного электрического слоя ( $\delta$ -DES).

Природу происхождения электрического заряда  $\delta$ -DES можно объяснить с позиции морфологии, где  $\delta$ -DES (нанофаза) можно представить в виде объёмного структурного образования типа **жидкого кристалла** (LC), где единичная молекула **гексомера** воды в декартовой системе координат ( $xoy$ ), дополнительно сшита перекрёстными водородными мостиками. По вектору оси-z гексомеры образуют **жидкие кристаллы** (LC) в виде дискообразных столбиков - гексогенаэдр (**домены**) [2].



а)

в)

Рис.2.1. Кристаллическая решётка жидкого кристалла (LC) воды: а) плоскопараллельная структура LC (дискотик), в) капиллярная структура LC (смектик).

С позиции механики LC является частично твёрдой структурой, где параллельное множество столбиков (типа-щётка), ориентированных перпендикулярно к вектору внешней силы, обладают свойствами твёрдого упругого тела  $\vec{F}_z = -kx$  (закон Гука), а со стороны вектора тангенциальной силы  $\vec{F}_{xoy}$ , ведут себя как вязкая жидкость. Если оценить работу  $\vec{F}_{xoy} \approx 5,0\text{--}20,0 \text{ кДж/моль}$  через теплоту гидратации, то очевидно, что работа вектора перемешивания жидкого тела на много меньше  $\vec{F}_{xoy} \ll \vec{F}_z$  работы вектора модуля упругих сил, т.е. требует совсем небольших затрат энергии.

На основании анализа морфологии LC, можно сделать выводы о возможности управления кинетикой LC путём тангенциального «*сцепления*» двух сил - вектора  $\vec{F}_z(t)$  с вектором  $-\vec{F}_{xoy}(t)$ , что позволит NM-технологии выйти на новый технический и энергетический уровень.

Толщина LC, как расстояние центра тяжести электрического заряда до границы  $\lambda$ -диффузного слоя рассчитывают по уравнению [1]:

$$LC = \sqrt{\frac{DRT}{8\pi c z^2 F^2}} \quad (1.1.)$$

где,  $D = 81$  – диэлектрическая проницаемость воды,  $R=8,32 \times 10^7$ ,  $T=291 \text{К}^0$ ,  $c$ -концентрация электролита  $\lambda$  – диффузного слоя,  $z$ – расстояние границы скольжения от  $\delta$  до  $\lambda$ ,  $F=2,9 \times 10^{14}$  э.е. - число Фарадея.

Расчётная толщина LC, как функция концентрации электролита для I-I валентного электролита (KCl) показана в Табл.1.

Таблица 1.

$c$ , г-экв/см <sup>3</sup>	LC, мк
$0,9 \times 10^{-10}$ (вода Колърауша), $\chi=3,8 \times 10^{-8} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	1,01
$1,0 \times 10^{-6}$	0,0096
$1,0 \times 10^{-4}$	0,00096

Из данных Табл.1. можно сделать вывод, что с ростом концентрации электролита в  $\lambda$  – диффузной фазе происходит сильное сжатие толщины LC/

### 3. Выражение энергии LC-осциллятора.

Если с течением времени энергетические параметры LC не меняют своих численных значений, то состояние системы считается равновесной или истинно стационарной.

Если в дополнение к этому энергетическому состоянию нет никаких внешних энергетических потоков (подпитка), тогда LC бесконечно долго находится в состояние энергетического равновесия (потенциальная «яма») и поэтому самостоятельно из равновесного стационарного состояния выйти не может [3].

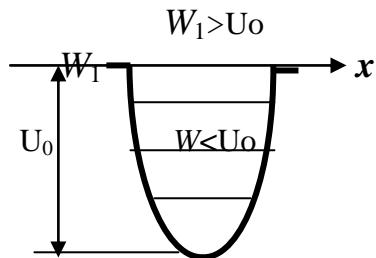


Рис.3.1. Графическое изображение энергии LC в потенциальной «яме».

На Рис.3.1. показана LC система с минимальной энергией  $W=mah \leq U_0$  находится в равновесии и не может выйти из потенциальной «ямы». Однако, равновесные системы обратимы, т.е. систему LC можно «**поднять**» из потенциальной «ямы» приложив воздействие внешнего источника энергии той же или большей величины. Вероятность поднять LC из потенциальной «ямы» возрастает пропорционально энергии  $W_1 > U_0$  вынуждающей внешней силе, максимальная величина которой равна:

$$W_1 \geq mah = mA^2 \omega_0^2 / 2 \quad (3.1.)$$

где,  $m$  – масса LC,  $a$  – ускорение,  $A$ -амплитуда,  $\omega_0$  - собственная циклическая частота колебания LC;  $h$  и  $H$  – минимальная и максимальная высота энергии потенциальной «ямы».

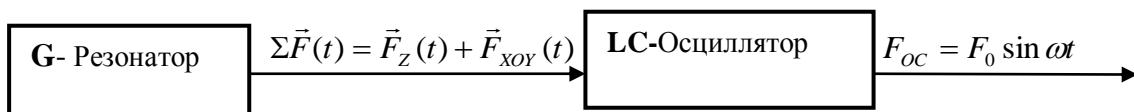


Рис.3.2. Схема вынужденного колебания LC-Осциллятора,  $G$  – Резонатор.

### 4. Энергия электромагнитного поля.

Вынужденные колебания LC-осциллятора можно осуществить подводом различной кинетической энергией: механическая, электрическая, магнитная, химическая, тепловая и др. Однако, учитывая наноразмеры LC, его электрическую природу, для вынужденного колебания LC, предпочтительно применить энергию электромагнитного поля (EMP). При прохождении через границу раздела двух плоско-параллельных **изотропных** фаз: LC (проводник –  $\mathcal{E}$ ) + мембрана (диэлектрик –  $\mu$ ), EMP образует вектор энергии  $\vec{P}_z$  (Рис.4.1)..

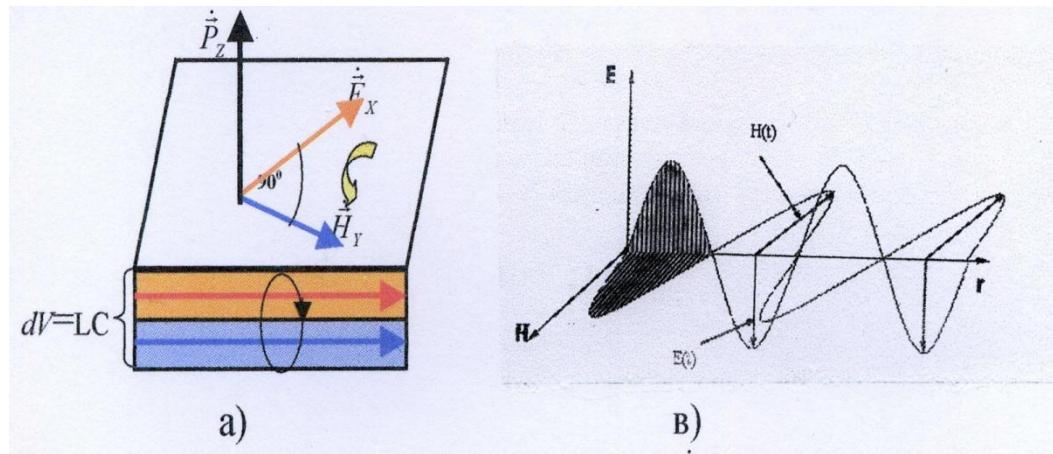


Рис.4.1. Электромагнитное поле двух изотропных фаз: мембрана+LC. а)  $\dot{\vec{P}}_z$  – вектор полной мгновенной энергии;  $\dot{\vec{E}}_x$  – вектор напряженности электрического поля,  $\dot{\vec{H}}_y$  – вектор напряжённости магнитного поля; в) Плоская электромагнитная волна.

Полная мгновенная энергия EMP, канализованная в LC-осциллятора определяется

уравнением Умова-Пойтинга [4]:

$$\dot{\vec{P}}_z = [\dot{\vec{E}}_x \dot{\vec{H}}_y] \quad (4.1.)$$

где,  $\dot{\vec{P}}_z$  - полная мгновенная энергия вектора EMP по направлению оси-z, образована двумя «сцепленными» в плоскости осей-*xoy* под углом  $90^\circ$  - вектором  $\dot{\vec{E}}_x$  напряжённости электрического поля и  $\dot{\vec{H}}_y$  -вектором напряжённости магнитного поля;

Мощность EMP в единице  $dV$  объема LC-осциллятора, в единицу времени, ограниченной поверхностью  $S$ , будет равна:

$$-\oint PdS = \oint_S \gamma \dot{\vec{E}}_x^2 dV + \oint_V \partial / \partial t (\epsilon \dot{\vec{E}}_x^2 / 2 + \mu \dot{\vec{H}}_y^2 / 2) dV \quad (4.2.)$$

где, левая часть  $\oint_S \gamma \dot{\vec{E}}_x^2 dV$  уравнения (4.2.)-энергия EMP **доставляемая** резонатором в  $dV$  объём LC-осциллятора, правая часть  $\oint_V \partial / \partial t (\epsilon \dot{\vec{E}}_x^2 / 2 + \mu \dot{\vec{H}}_y^2 / 2) dV$  -энергия **расходуемая** в  $dV$  объёме LC-осциллятора, в единицу времени;

Таким образом, мы имеем LC-осциллятор, где энергия плоской электромагнитной волны образована двумя «сцепленными» под  $\pm 90^\circ$  вектором  $\dot{\vec{E}}_x$  и вектором  $\dot{\vec{H}}_y$ .

Если представить энергию EMP  $\dot{\vec{P}}_z = [\dot{\vec{E}}_x \dot{\vec{H}}_z]$  замкнутым контуром, где фазированные векторы  $rot \dot{\vec{E}}_x = E_0 \sin \omega t$  и  $rot \dot{\vec{H}}_y = H_0 \sin \omega t$  «сцеплены» друг с другом, тогда энергия  $rot \dot{\vec{E}}_x$  образует  $\dot{\vec{B}}$ -вектор магнитной индукции, что приводит к вихревой конвекции и увеличению кинетики массопереноса LC-осциллятора [8-10].

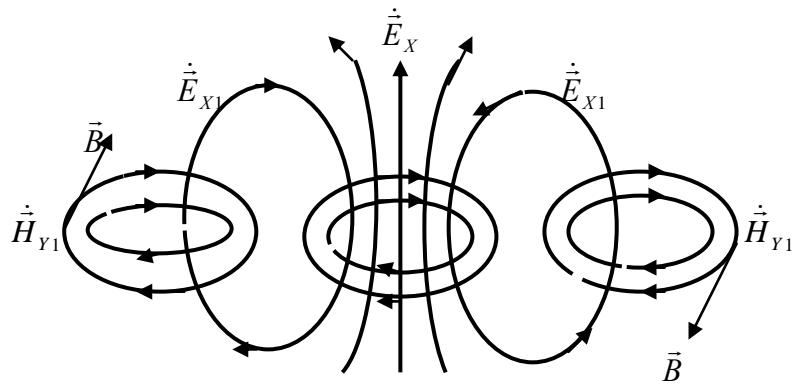


Рис.4.2. Сцепленный ротор электромагнитного поля правого винта.



Рис.4.3. Образование ротора вихревой конвекции LC-осциллятора в виде поверхностного наномембранный слоя с частотой релаксации вихрей от 10 до 30 сек, полученная методом лазерной интерферометрии [8].

## 5. Кинетика электромагнитного поля капилляра

Рассмотрим случай прохождения электромагнитного поля (EMP) через *анизотропную* среду, где фаза диэлектрика мембраны пронизана сквозной цилиндрической порой (капилляр) конечной  $\Delta l$ -длины, заполненна фазой токопроводящего электролита (Рис.5.1.).

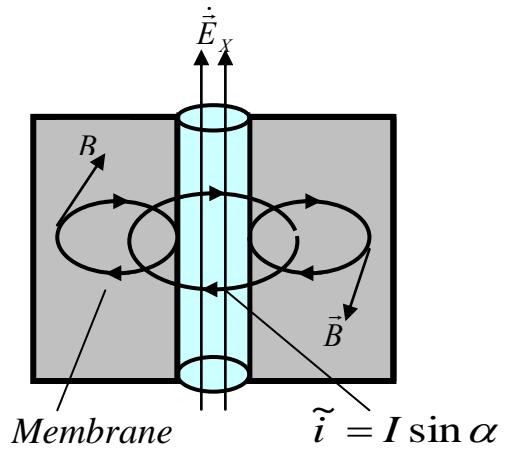


Рис.5.1. Ротор EMR капилляра мембраны.

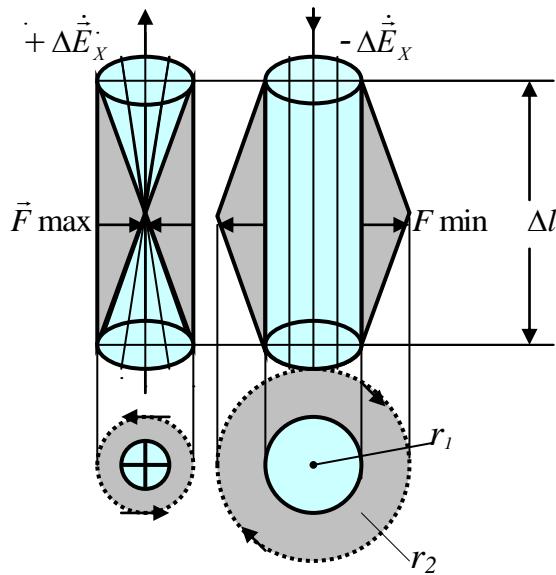


Рис.5.2. Магнитное поле внутри капилляра  $\Delta l$ ;  $r_1$  — проводник (электролит),  $r_2$  — диэлектрик (мембрана),  $\vec{F}_{\max}$ ,  $\vec{F}_{\min}$  — сила механического действия магнитной индукции,  $\oplus$  — капилляр «закрыт»,  $\ominus$  — капилляр «открыт».

Вектор-  $\vec{H}_y$  магнитного поля определяет силовое механическое действие в диэлектрике  $\Delta l$ -капилляра (сила Ампера):

$$\vec{F} = \int_l \tilde{i} \vec{B} \Delta l \sin \alpha \quad (5.1.)$$

где,  $\tilde{i}$  - переменный электрический ток,  $\vec{B} = \mu \tilde{i} / 2\pi r_2$  - вектор магнитной индукции,  $\Delta l$  - длина капилляра и синус угла  $\alpha$  между направлением тока и вектором магнитной индукции;  $\mu$  — магнитная проницаемость диэлектрика (мембрана);  $r_2$  - радиус диэлектрика.

Если максимальная величина механической силы равна  $\vec{F} = \vec{F}_{\max}$ , тогда при условии  $\sin \alpha = 1$ , капилляр  $\Delta l$ -«закрыт», если минимальная величина механической силы равна  $\vec{F} = \vec{F}_{\min}$ , тогда при условии  $\sin \alpha = 0$ , капилляр  $\Delta l$ -«открыт».

Соответственно, движение вектора протока электролита через капилляр: «вверх» ( $+\dot{\Delta E}_x \uparrow$ ), «вниз» ( $-\dot{\Delta E}_x \downarrow$ ) (Рис.5.2.).

### 6. Резонанс LC-осциллятора.

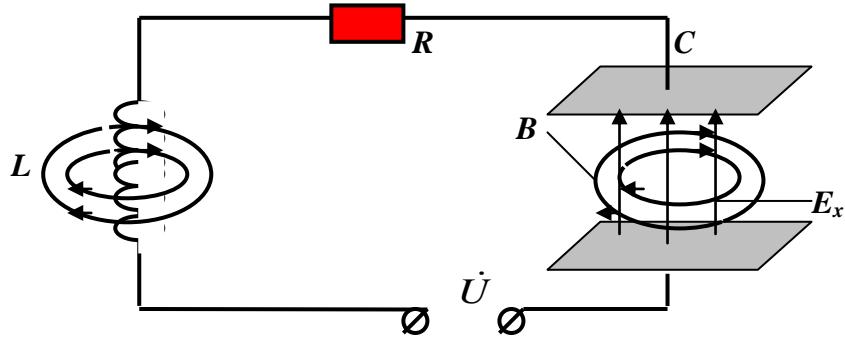


Рис.6.1. Схема колебательного контура RCL.

На основании электромагнитной модели LC-осциллятора можно построить эквивалентную модель в виде колебательного контура: RCL.

Мгновенная мощность LC-осциллятора с элементами последовательной цепи RLC равна:

$$\check{S} = \dot{U}\tilde{I} \sin\varphi = 1/2\dot{U}_0\tilde{I}_0Z \quad (6.1.)$$

где,  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  — импеданс,  $R$  — активное сопротивление,  $X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление катушки,  $X_C = 1/\omega C$  — индуктивное сопротивление конденсатора,

Отношение энергии, запасенной реактивными элементами контура (CL), к энергии (R) омических (резистивных) потерь за один период, в котором все три элемента включены последовательно RCL, ( $Q$  — добротность) вычисляются:

$$Q = 1/R \sqrt{L/C} \quad (6.2.)$$

Для амплитудно-частотных характеристик параллельного колебательного контура, в котором индуктивность и ёмкость включены параллельно, добротность равна:

$$Q = R\sqrt{C/L} = W_L + W_C = L\tilde{I}^2/2 + C\dot{U}^2/2 \quad (6.3.)$$

Явление *резонанса* LC-осциллятора возможно путём фазирования  $\omega_0$  — собственной частоты колебания с  $\omega$  — вынужденной частотой колебания.

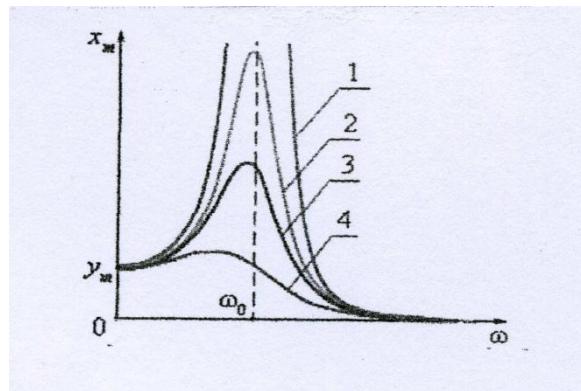


Рис.6.2. Резонансные кривые LC-осциллятора при различных уровнях добротности: 1. осциллятор без трения; 2,3,4- осциллятор с различной добротностью

Когда величины реактивных сопротивлений катушки  $X_L = \omega L$  и конденсатора  $X_C = 1/\omega C$  равны по модулю. Величину собственной резонансной частоты колебания LC-осциллятора рассчитывают по формуле  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . Частотный резонанс при условии  $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  должен привести к увеличению кинетики массопереноса за счёт интенсивной конвекционной составляющей LC-осциллятора

Кроме ожидаемого роста  $Q$  — добротности, есть вероятность процесса селективного **резонансного** разделения ионов полиэлектролита по: массе, валентности и знаку заряда, что требует экспериментальной оценки.

## 7. Экспериментальная часть

### 7.1. Определение ёмкость жидкого кристалла (LC).

Исследовалась ёмкость LC как функция  $C=f(c,f)$  на границе раздела фаз: мембрана + электролит. Ёмкость LC определялась на концентрациях электролита:  $0,01M$ ;  $0,1M$ ;  $1,0M$   $NaCl$  в двухкамерной электродиализной ячейке (EDS), изготовленной из фторопласта с электродами из платины (Pt), с перегородкой из пористой полимерной мембранны,

Ячейка включалась в мостовую схему с возможностью балансирования моста на частотах переменного электрического тока в пределах  $f=40Hz - 50kHz$ .

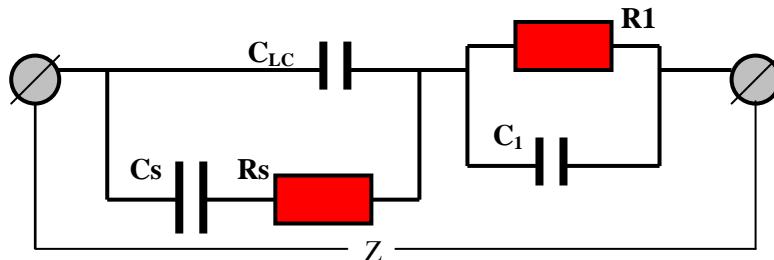


Рис.7.1. Электрическая эквивалентная схема ячейки:  $C_s$  — ёмкость поляризационная,  $C_1$  — ёмкость электролита,  $C_{LC}$  — ёмкость LC-осциллятора,  $C_s$ -поляризационная,  $R_s$  — сопротивление поляризационное,  $R_1$  — сопротивление электролита,  $Z$  — импеданс ячейки.

Значения величины ёмкости LC устанавливались по отрезку отсекаемому прямой построенной в координатах  $C_E^{-1} - (\omega R_1)^2$ . Были получены графики показанные на Рис.7.2. Для каждой концентрации электролита, нижняя линия в семействе прямых отсекает на ординате графика суммы ёмкостей  $C_\Sigma$  ячейки.

Емкость мембраны вычислялась по формуле:

$$C_{LC} = C_{\Sigma} - C_E \quad (7.1.)$$

Были получены графики, семейства прямых: 0,01M, 0,1M и 1,0M NaCL, где нижняя линия для каждой концентраций электролита, отсекают на ординате графика ёмкости  $C_{LC}$  мембранны, соответственно:  $+0,4mkF^{-1}$ ;  $+0,3mkF^{-1}$ ;  $-0,05mkF^{-1}$ .

Было установлено, что с повышением концентрации раствора NaCL электролита происходит снижение емкости  $C_{LC}$ , что объясняется «сжатием» толщины LC.

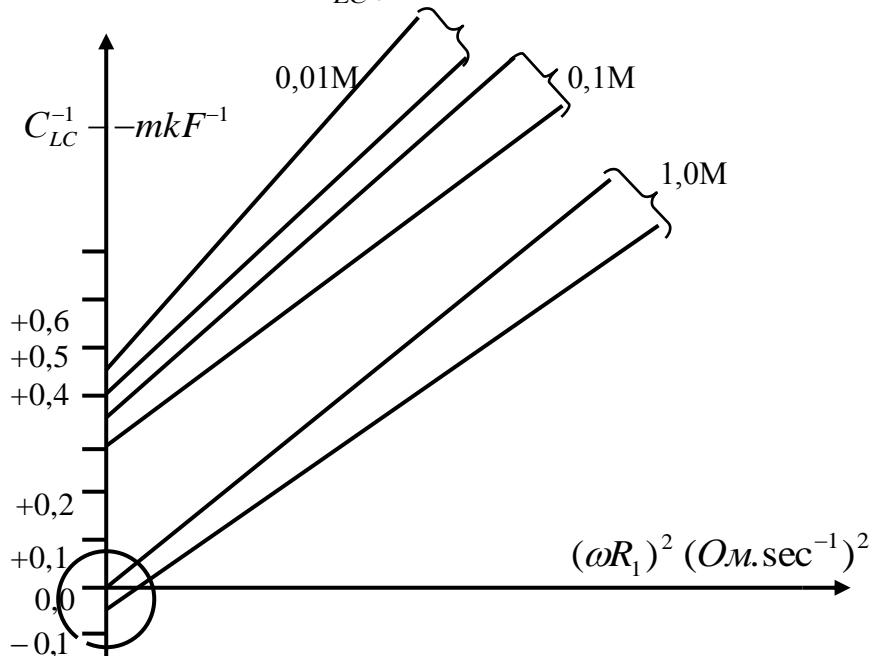


Рис.7.2. Емкости LC в зависимости от концентрации электролита.

Для раствора концентрации электролита 1,0M NaCL, нижняя линия отсекает на ординате графика отрицательный ёмкости, что связано с появлением вихревой конвекции LC-осциллятора.

## 7.2. Определение собственной частоты колебания LC-осциллятора.

Частоту  $f_o = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$ , [Hz] собственных колебаний LC определяли путем релаксации LC мембранны ударным однополярным электрическим импульсом (цуг), различной  $q = \tau / \tau_H$  скважностью в электромембранный ячейке (EDS), заполненной раствором NaCL 0,01-1,0M.

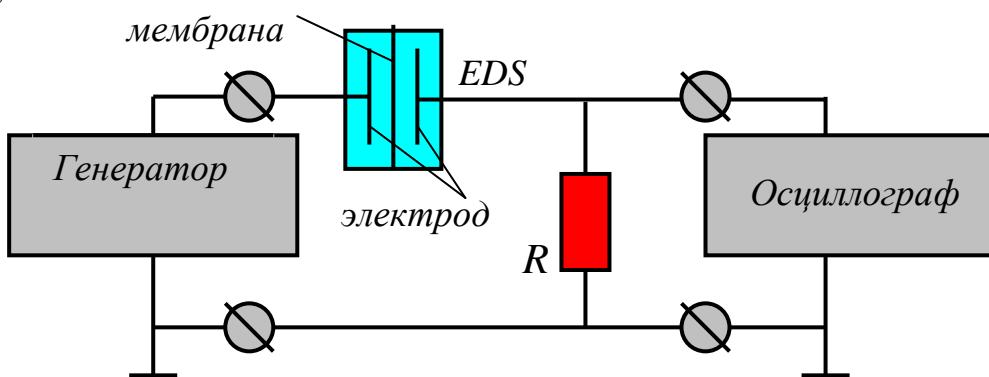


Рис.7.3. Схема подключения электродиализной ячейки (EDS).

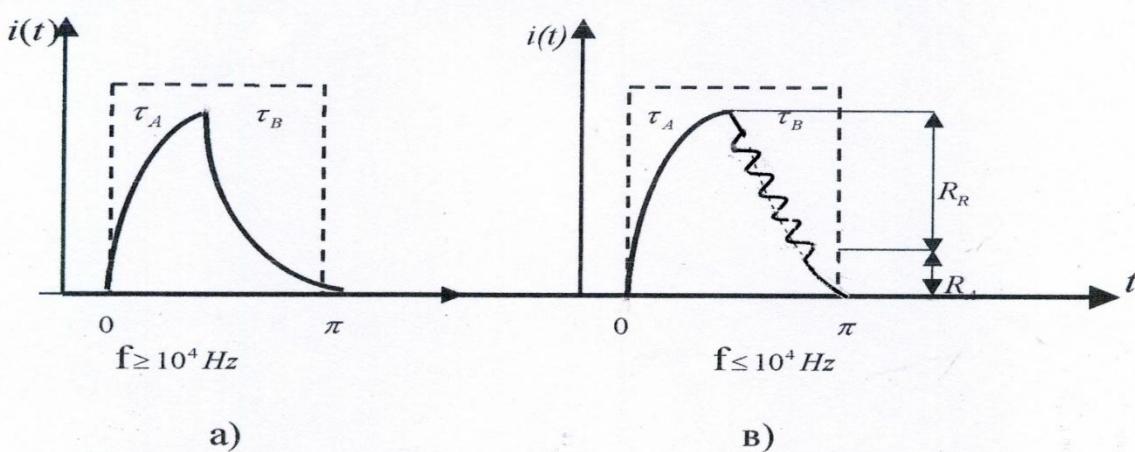


Рис.7.4.. Форма импульса тока  $I(t)$  при прохождении через мембрану EDS .

В результате импеданса цепи  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ , при прохождении импульса тока через мембрану, происходит искажение прямоугольного импульса, форма которого фиксировалась двухлучевым осциллографом на сопротивлении 1кОм. В результате релаксации и ослабления электрического заряда  $\tau_A(t)$  – передний фронт импульса растет по выпуклой экспоненте:

$$i = I(1 - e^{-t/RC}), \quad (7.2.)$$

где,  $t$  – постоянная времени цепи  $RC$  – прямоугольного импульса.

В результате полного *электрического заряда*  $LC = U_m$ , передний фронт импульса –  $\tau_A(t)$  обрывается и  $LC$  – мембранны сам становится источником кинетической энергии, который совершать работу  $\tau_H(t)$  – *электрического разряда* в виде вогнутой кривой, которую можно выразить через показательную функцию:

$$i = Ie^{bt} \quad (7.3.)$$

...В процессе релаксации LC установлена зависимость  $\tau_H(t) = f(f, c)$ , как функция частоты колебания генератора и концентрации солей электролита. Установлено, что на относительно высоких частотах импульса ( $f \geq 10^4 \text{ Hz}$ ) и выше, фиксировались простые переходные процессы электрического тока - форма импульсов искажалась стандартно (Рис.7.4а.).

При воздействии импульсов низкой частоты и ниже ( $f \leq 10^4 \text{ Hz}$ ), наблюдаются процессы автоколебания электрического разряда  $\tau_H(t) = I \cos \omega t$ , что объясняется явлением резонанса электромагнитного поля LC –осциллятора (Рис.7.4в).

### 7.3. Селективное осаждение металлов электролита.

Исследования селективного осаждению металлов электролита (гальваника) исследовалась путем электромагнитного резонанса LC- осциллятора. Генератор EMP подключали к электролитической ванне по схеме колебательного контура RLC.

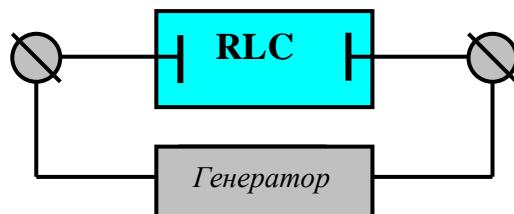


Рис.7.5.Эквивалентная схема колебательного контура RCL.

Количество и качество резонансного покрытия металлов из водных растворов солей: цинк (Zn), никель (Ni), железо (Fe), медь Cu), серебро (Ag), свинец (Pb), оценивалась по физико-механическим свойствам (твёрдость, мелкозернистость и др.). Исследования показали, что наилучшие физико-механические свойства катодного металла получены на соответствующих селективных для каждого элемента резонансных частотах. Численное значение резонансных частот подчиняется строгой закономерности по формуле:

$$f_R = K/nA$$

где,  $K$  – предельная резонансная частота протона водорода,  $n$  – валентность осаждаемого элемента,  $A$  – атомный вес осаждаемого элемента.

Экспериментальные резонансные частоты приведены в Табл. 2.

Элемент	Валентность	Атомная масса, а.е.м	Резонансная частота, Hz	Соль
Pb	2	207,2	232,9	PbSO <sub>4</sub>
Pb	4	207,2	116,5	Pb(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>
Ni	2	58,7	882,0	NiSO <sub>4</sub>
Fe	2	55,84	864,2	FeSO <sub>4</sub>
Cu	2	63,54	758,9	CuSO <sub>4</sub>
Cd	2	112,4	429,3	CdCL <sub>2</sub>
Ag	1	107,87	886,5	AgNO <sub>3</sub>
Zn	2	118,69	566,1	ZnCL <sub>2</sub>

Толщина покрытия осажденного металла почти прямо пропорциональна времени (3,2 mkm -10 minute; 5,5 mkm-15 minute; 6,2 mkm-20 minute и т.д.), что говорит возможности эффективного промышленного применения резонансной технологии для гидрометаллургии и гальваники

#### 7.4. Селективное разделение ионов полиэлектролита.

Возможность мембранныго разделения полиэлектролитов, путём селективного концентрирования электролита проводилось на трёх камерном электродиализном аппарате. Разделение полиэлектролита проводилось в диапазоне частот  $f_0 = 10^1 - 10^4 \text{ Hz}$ , при плотности электрического тока  $(5-10)10^{-4} \text{ A/cm}^2$  и индукции магнитного поля  $75-220 \times 10^{-4} \text{ T.s}$ .

Таблица 3.

Экспериментальные данные по разделению ионов

Система ионов	Частота, $f, \text{Hz}$	Концентрация ионов в электролите, моль				Коэффициент разделения, $K$
		Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	CL <sup>-</sup>	
<i>Постоянный ток</i>						
Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	0	10 <sup>1,2</sup>	10 <sup>0,3</sup>	-		10 <sup>-0,4</sup>
OH <sup>-</sup> /CL <sup>-</sup>	0	-	-	10 <sup>5,1</sup>	10 <sup>1,2</sup>	10 <sup>-3,9</sup>
<i>Электромагнитное поле</i>						
Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	0,1	0	10 <sup>0,4</sup>	-	-	Полное
OH <sup>-</sup> /CL <sup>-</sup>	0,5	-	-	0	10 <sup>0,1</sup>	Полное

где,  $K = (C_1 / C_2) / (C_1^1 / C_2^1)$  – коэффициент разделения.

Резонанс LC мембранны для селективного разделения ионов проводили на трехкамерном непроточном растворе полиэлектролита  $(Li^+ + K^+)CL^-$  концентрацией 0,005 Моль/л аппарате заполненного схема которого показана на Рис.7.3.

На клеммы электродов аппарата подавали энергию генератора с регулируемой частотой импульса.

Табл. 4.

Энергия	Мощность, wt/ht	Частота, $f Hz$	Коэффициент разделения	$\varphi\%$ выхода $Li^+$
Постоянный электрический ток (DC)	32,0	0,0	2,9	15,2
Электромагнитное поле (EMF)	18,4	50,0	2,3	18,3
« - »	20,0	1000,0	3,5	22,8
« - » <i>резонанс</i>	<b>12,0</b>	<b>500,0</b>	<b>161,0</b>	<b>99,7</b>

На основании экспериментальных данных Табл.4 видно, что процесс селективного переноса иона лития через биологическую мембрану из бинарного  $(Li^+ + K^+)CL$  раствора, происходит под действием энергии электромагнитного поля, при резонансной частоте  $f_p=500 Hz$ .

**Выводы:** Установлено:

- 1) -Что на границе раздела фаз: мембрана, (электрод)+электролит, всегда присутствует электрический заряд ( $\delta - DES$ ), как следствие материальной нанофазы (мезофаза) с морфологией жидкого кристалла (LC).
- 2) -Масса LC- фазы есть функция концентрации  $\lambda$  – диффузной фазы электролита.
- 3) -Энергия электромагнитного поля (EMF) внешнего источника всегда индуцирует ротор вихревой конвекции LC-осциллятора (силы Лоренца), что приводит к значительному росту к.п.д. ( $\approx 80 - 90\%$ ) мембранных массопереноса процессов: электролиз, электроосмос, реверсосмос, биоосмос и другие.
- 4) -Управление резонансом EMF позволило создать энергосберегающий, экологичный мембранный процесс хроматографического разделения ионов полиэлектролита по массе, валентности и знаку заряда для гидрометаллургии, обессоливания воды и других промышленных отраслей науки и техники.

## Список литературы

- 1.Медведев И.Н., а.с.СССР, №139884,В01D13/02,1988; №1507413,А1,В01D13|02,1989; Патенты: WO 91/04782,1991; PCT/GB 93/00675, 1993; GB 2265633,А,1993; Espanola P9902681; USA 5,589,050,1996.
2. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы –М.: Мир, 1980. 34 с.
3. Большой Энциклопедический Словарь, Физика. М.,1998. 581 с.
- 4.Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Изд.Высшая школа, 1978.
- 5.Бриксман В.Д., Неволин В.Г. Параметрическое возбуждение поверхности МГД волн в скрещенных электрическом и магнитном полях.- Тезисы X Рижского совещ.,1981.
6. Гак Е.З. Магнитокинетические явления в водных растворах электролитов. Электрохимия. 1976,т.12,№5,Деп.В ВИНИТИ, №3511-75.

7. Шарыгин А.П., Даниэлян Г.Л., Алимова Р.З. О действии магнитного поля на характеристики капиллярной ртутно-электролитической ячейки. Электрохимия, 1979, т.11, №10, с.1478-1481.
8. Гак М.З. Лабораторные исследования автоколебаний в системе четырёх вихрей.-Изв.АН СССР. ФАО,1981,т.17,№2,с.209-213.
9. Блюменфельд Л.А., Зацепина Г.Н., Позин Е.Я., Тульский С.В. Исследование влияния магнитного поля на пространственное распределение электропроводности воды и водных растворов электролитов, устанавливающееся в процессе электролиза.Ж.физической химии, т.XLV, №8,1972.с.2073-2077.
10. Васильева В.И., Шапошник В.А., Григорчук О.В. и др. Лазерная интерферометрия в исследовании кинетики электродиализа // Электрохимия. 2002.т.38,.№8,с.949-955.
- 11.Козадерова О.А. Шапошник В.А., Шапошник Д.А. Колебательная неустойчивость концентрационного поля в сопряженных секциях концентрирования и обессоливания при интенсивных режимах электродиализа, ГОУ ВПО«ВГУ» 2009,с.345-353.